

# 演奏しやすいステージ空間のための反射音方向分布に関する基礎的研究

林 光一郎

## 1. はじめに

コンサートホールのステージに関する研究は少なく、音場の解明が十分なされていないと言え難い。しかし、聴衆により音楽を提供するためには、演奏者が気持ちよく演奏できる音場を創り出す必要があると考えられる。

ステージ音響に関しては、Gade<sup>1)</sup>による評価指標 *ST* の提案があるが、反射音の時間情報のみに着目しており、方向情報は考慮されていない。本研究では、客席音場の空間印象 (*LEV*) が反射音の方向分布に関係することを示してきたが、ステージ音場においても反射音の方向分布が“演奏しやすさ”に関係するのではないかと考え、反射音方向分布の異なる模擬音場を用いた“演奏しやすさ”の評価実験を行い、*ST* が等しくても反射音方向分布が異なると演奏しやすさに違いが認められることを示した<sup>2)3)4)5)</sup>。よって、ステージ空間における反射音方向分布のより詳細な検討が必要である。

そこで、本研究では、反射音方向分布が演奏しやすさに与える影響を検討すること目的として、音場評価実験を行った。さらに、演奏者が好ましいと感じている位置と、反射音方向分布特性の関係を明らかにすることを目的として、アンケート調査を行った。最後に、これらの結果を踏まえ、音響的に演奏しやすいステージ空間を創るために、ステージ形状が反射音方向分布に与える影響について音場シミュレーションを行った。

## 2. 演奏者による音場評価実験

反射音方向分布が演奏しやすさに与える影響を検討することを目的とし、実ホールのステージ上で測定した方向別(前・後・左・右・上・下)のインパルス応答を用いて模擬音場を構成し、演奏者による音場評価実験を行った。被験者はアマチュア奏者とプロ奏者であり、両者の評価の比較を行った。

### 2.1 実験方法

#### 2.1.1 実験システム

被験者の演奏音を単一指向性マイクロホンで收音し、これにステージ音場を模したインパルス応答をリアルタイムに畳込み、無響室内の左右上下前後の6個のスピーカから反射音として発生させる(図-1)。被験者は演奏しながら演奏音と反射音を聴き、音場を評価する。

#### 2.1.2 実験音場

反射音方向分布の異なる5つの音場(a, b, c, d, e)を構成した(図-2)。これらは、図-3に示すステージ上の位置を想定している。各音場のインパルス応答は、実ホールのステージ上のdの位置で測定したインパルス

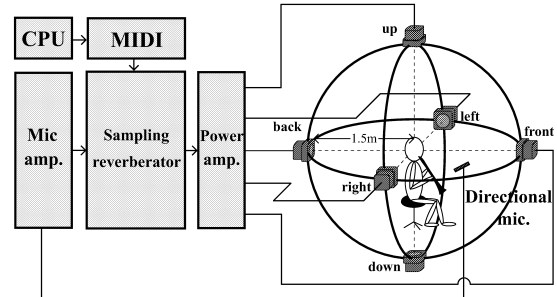


図-1 実験システム

応答(6方向)であり、d以外の音場は、ステージ上のそれぞれの位置の反射音方向分布を模擬するように振幅を変化させたものである。なお、直接音成分(0-5ms)は除外し、各音場の5-100msまでの相対音圧レベルは、全音場でほぼ等しく、よって*ST*もすべて等しい。

音場aはステージセンターライン上に位置し、左右と前後のエネルギーがほぼ等しい。音場bは音場aより上手側に位置し、左右のエネルギーに差がある。音場cはステージセンターライン上の客席寄りに位置し、前後のエネルギーに差がある。音場dはステージ客席寄りの上手側に位置し、左右も前後もエネルギーが異なる。音場eは5点の中で最もステージ奥に位置し、後方のエネルギーが大きく、下のエネルギーとほぼ等しい音場である。

#### 2.1.3 評価方法

5音場を対にした10対をランダムに呈示し、被験者に、演奏しながら演奏音と反射音を聴き、「響きの量」「響きの量の良悪」「響きの長さ」「響きの長さの良悪」「響きの質」「響きの質の良悪」「響きのバランスの良悪」「明瞭性の良悪」「速いテンポ曲の演奏しやすさ」「遅いテンポの曲の演奏しやすさ」「ステージの広さ」「ステー

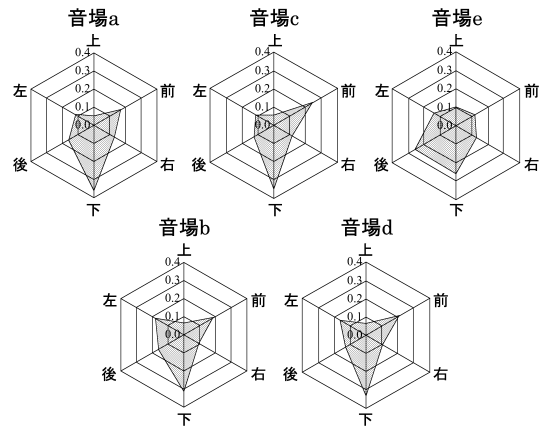


図-2 実験音場の反射音方向分布

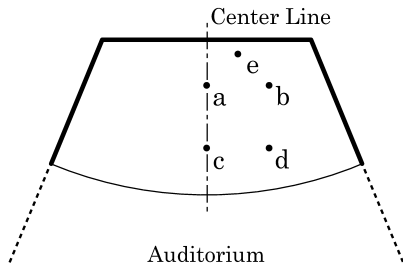


図-3 ステージ上の音場の位置

「客席の大きさ」 「客席の大きさ良悪」 「客席への音の到達感」 「客席への音の到達感の良悪」 「総合的な演奏しやすさ」の17項目について、一対比較法を用いて評価してもらった。

被験者は、10年程度の演奏経験を有するアマチュアのクラリネット奏者3名と20年程度の演奏経験を有するプロのクラリネット奏者2名である。実験回数は、アマチュア奏者は各人3~4回で合計11回、プロ奏者は各人4回で合計8回である。

評価に用いた楽曲は「チャールダーシュ」と「ティップス7番」の2曲とし、教示にて前者をテンポの速い曲、後者をテンポの遅い曲として指定した。

## 2.2 結果と考察

被験者ごとに、各対の評価結果より、各質問項目について、対象音場が比較音場に対し「良い」と評価された場合を1点とし得点を算出した。

### 2.2.1 「総合的な演奏しやすさ」の評価

アマチュア奏者とプロ奏者による「総合的な演奏しやすさ」の得点について、それぞれ11回と8回の実験結果の平均を図-4に示す。

まず、アマチュア奏者は、音場dの評価が特に高くなっている。また、音場bも比較的高い評価となっている。これらの2音場は、ステージ上の側壁に近い位置を模擬したもので、共通する特徴として左右の反射音のエネルギーが異なる点が挙げられる。評価の低い音場は順に音場c, e, aである。これらはすべてステージのセンターライン上もしくはそれに近い位置を模擬したものであり、左右の反射音のエネルギーが等しい。

次に、プロ奏者は、音場bと音場d、次いで音場eの評価が高くなっている。音場eは、唯一、後方からの反射音が大きい音場である。特に評価の低い音場は音場aであり、左右および前後の反射音のエネルギーが等しい音場である。

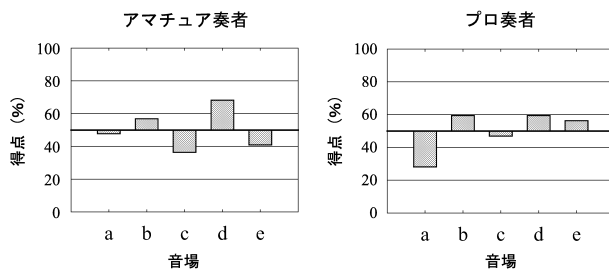


図-4 「総合的な演奏しやすさ」の評価

以上より、左右の反射音のエネルギーが異なる音場は評価が高く、プロ奏者は後方から強い反射音が到来する音場も高く評価するという結果であった。

### 2.2.2 アマチュア奏者とプロ奏者の比較

アマチュア奏者とプロ奏者の「総合的な演奏しやすさ」の評価を比較すると、音場bと音場dの評価が高い点で一致している。しかし、音場eの評価が異なっており、特に「客席の大きさ」という空間印象に関する項目において評価に差が見られた(図-5)。「客席の大きさ」の大小については、プロ奏者、アマチュア奏者ともに「大きい」という一致した評価となっている。しかし、良悪に関しては、アマチュア奏者が低く評価するのに対してプロ奏者は高く評価している。このことから、後方から強い反射音が到来する音場は大きい空間であると判断されるが、その良否の判断は被験者によって異なる、と理解される。

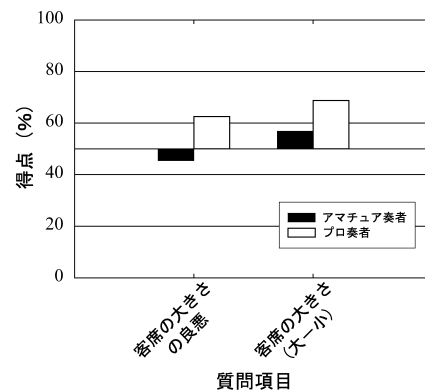


図-5 音場eの「客席の大きさ」の評価

## 2.3 まとめ

以上のように、模擬音場を用いた評価実験から、左右の反射音のエネルギーに差がある音場は評価が高く、プロ奏者は後方から強い反射音が到来する場合も高く評価することがわかった。このような、プロ奏者が多くの基準を用いて敏感に音場を判断する傾向は、演奏経験の豊かさによるものと考えられる。

## 3. 演奏しやすい位置に関するアンケート

2. では、反射音方向分布に着目した模擬音場の評価実験から、反射音の方向分布と演奏しやすさの関係について検討してきた。評価実験では、実験に用いた音場がステージ上のどの位置を模擬しているかを被験者は知らされていないが、実際のステージにおける演奏では、演奏者はステージの位置を認識しているわけである。ところで、演奏者が好ましいと感じているステージ上の位置はどこで、そして演奏者の好ましい位置の判断にステージの音響特性(STなどの時間特性や反射音方向分布など)が関係しているのだろうか。

これを明らかにするための第一ステップとして、写真を用いてステージ上の位置を示し、ステージの位置の違いによる演奏しやすさを評価してもらうという簡単なアンケート調査を行った。

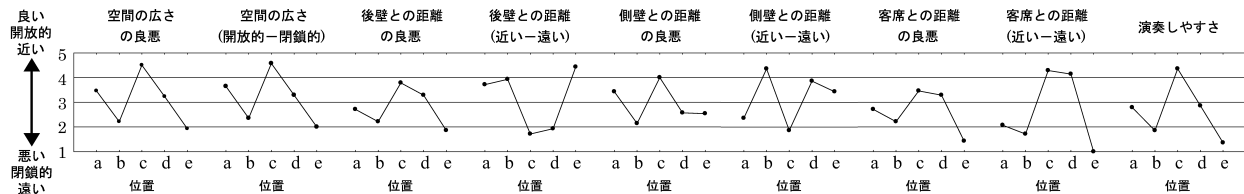


図-7 アンケートの結果



図-6 評価するステージ上の位置

### 3.1 アンケート方法

#### 3.1.1 評価する位置

2. の評価実験に用いた 5 つの反射音特性に近いと想定されるステージ上の 5 つの位置 a, b, c, d, e(図-3) をアンケートの評価対象として指定した。

#### 3.1.2 評価方法

ステージ上の 5 つの位置を図示し(図-6), それぞれの位置で演奏していると想定して, 「空間の広さ」「空間の広さの良悪」「後壁との距離」「後壁との距離の良悪」「側壁との距離」「側壁との距離の良悪」「客席との距離」「客席との距離の良悪」「演奏しやすさ」の 9 項目について, 5 段階評価を求めた。

回答者は, 10 年以上の演奏経験を持つ 15 人である。

### 3.2 結果と考察

評価結果(平均値)を図-7 に示す。良悪に関するすべての項目において位置 c の評価が高くなる結果となった。「空間の広さ」は, 開放的であるとされるほど評価が高い。「後壁との距離」と「側壁との距離」は, 壁に近いとされた場合良悪の評価が低くなり, 「客席との距離」は, 遠いとされた場合評価が低くなる。最後に「演奏しやすさ」は, 位置 c が高い評価となっており, ステージ側壁・客席との距離, 空間の広さ, すべての項目において高い評価となった。

#### 3.3 まとめ

アンケート調査から, 演奏者は, ステージ上の演奏位置の違いによって演奏しやすさに差があると感じているという結果が得られた。すなわち, ステージのセンターライン上の客席寄りの位置は空間が開放的で演奏しやすく, ステージ隅部などの著しく壁に近い位置は閉鎖的で演奏しにくい, と感じられている。

### 4. 演奏しやすい音場と演奏しやすい位置の比較

音場評価実験によって演奏しやすいと評価された反射音方向分布を有するステージ位置と, アンケート調査で演奏しやすいとされたステージ上の位置を比較し

て図-8 に示す。

アンケート調査で好ましく演奏しやすいとされた位置は, ステージのセンターライン上の客席寄り(c の位置)であるが, この位置は, 左右から均等な反射音が到来する音場であり, 音場評価実験では演奏しやすい音場とは評価されない。一方, e の位置は, アンケート調査では極端に低い評価であるが, 音場評価実験ではプロ演奏者に演奏しやすい音場として高く評価された。このように, 演奏者が演奏しやすいと思っているステージの位置と, 模擬音場を用いた音場評価実験によって演奏しやすいと評価される音場特性を有するステージ位置は必ずしも対応していないことが明らかになった。実際のステージで演奏する場合, 「演奏しやすさ」には, 反射音方向分布等の音響特性だけではなく演奏位置の違いやステージ上からの客席の見え方などの多様な要因が寄与していると考えられる。

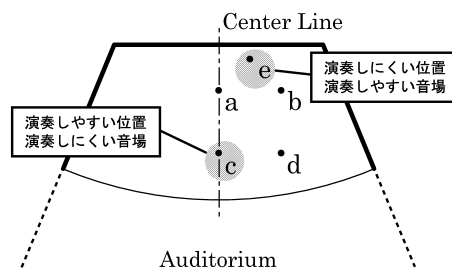


図-8 演奏しやすい音場と演奏しやすい位置の比較

### 5. 非対称型ステージの音場シミュレーション

2. の評価実験および 3. のアンケート調査より, ステージを演奏者のより演奏しやすい空間にするためには, ステージのセンターライン上において, 左右の反射音エネルギーに差がある音場を作る必要性があることが示唆された。ステージ形状を非対称型にすることで, 左右の反射音エネルギーに差を持たせることができると考えられる。そこで, ステージの左右側壁の開き角度を変化させた単純な非対称型ステージについて, 幾何音響シミュレーションを用いて, 左右の反射音エネルギーにどの程度の差が出るのか検討した。

#### 5.1 解析条件

非対称型ステージ内での音の伝播経路を音線法と虚像法のハイブリット手法によって, 観測点におけるエネルギーインパルス応答を算出した。得られたエネルギーインパルス応答から反射音の方向情報, 時間情報ならびに周波数ごとのエネルギーが得られ, これより方向別の反射音レベルを算出した。なお, シミュレーションの設定条件は, 放射音線本数 10,000 本, 音線の追跡状

ち切り時間 100 ms, 反射次数 10 次とした。

## 5.2 解析モデル

収容人数 700 人程度の中規模ホールステージを想定し, 幅 18 m, 奥行き 9 m, 高さ客席側 9 m, ステージ奥 6 m とした。側壁の開き角度  $\theta_R$  と  $\theta_L$  を  $0^\circ$  から  $30^\circ$  で  $10^\circ$  毎に変化させ, 計 10 パターンのモデルを解析対象とした (表-1)。各構成部材の吸音率を表-2 に示す。なお, ステージ形状が音場に与える影響に着目するために, 客席側開口部の吸音率を 1.00 とした。音源は 90 dB の無指向性音源であり, ステージのセンターライン上の客席側先端部より 1.0 m, 高さ 0.95 m の位置に設定した。観測点は, 音源に対してステージ奥側 0.5 m, 高さ 1.1 m の位置であり, これらは座奏を想定したものである。

表-1 解析モデルのステージ形状

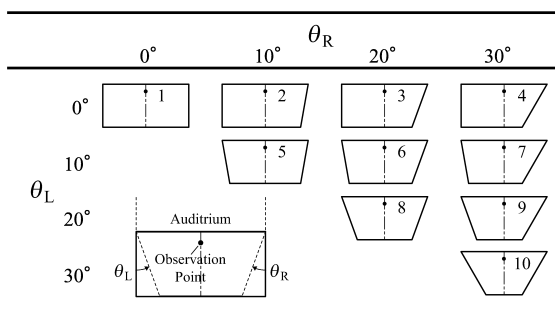


表-2 吸音率一覧

	中心周波数(Hz)					
	125	250	500	1k	2k	4k
ステージ床	0.16	0.14	0.11	0.08	0.08	0.07
ステージ周壁・天井	0.20	0.13	0.10	0.07	0.06	0.06
客席側開口部	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

## 5.3 結果と考察

シミュレーションより得られたエネルギーインパルス応答より, 直接音を除く 100 ms までの左右方向から到来する反射音の反射音レベルを算出した (図-9)。

まず, 左からの反射音レベルは,  $\theta_L$  が小さいほど大きくなり,  $\theta_L$  が変化しない場合は,  $\theta_R$  が大きくなるほど値が大きくなっている。右からの反射音レベルは,  $\theta_R$  が  $0^\circ$  の場合が最も大きく,  $\theta_R$  が  $0^\circ$  より大きい場合は,  $\theta_R$  が大きくなるほど大きな値となっている。これは, ステージ側壁と観測点との距離が近づくことで, 反射音レベルが大きくなっているものと考えられる。

左右からの反射音の相対音圧レベルは,  $\theta_L$  と  $\theta_R$  が等しい場合は 0 dB となっている。 $\theta_L$  と  $\theta_R$  が異なる場合は  $\theta_L$  が  $0^\circ$  の時に特に大きくなり, 最大でモデル 3 において 1.9 dB となっている。

なお, 2. の評価実験において評価の高かった音場の左右反射音の相対音圧レベルは, 2.0~2.8 dB であった。このことを踏まえると, ステージ形状を非対称型にするだけでは, 左右の反射音エネルギー差が不十分であることが明らかとなった。

## 5.4 まとめ

以上より, ステージの左右側壁の開き角度を変化さ

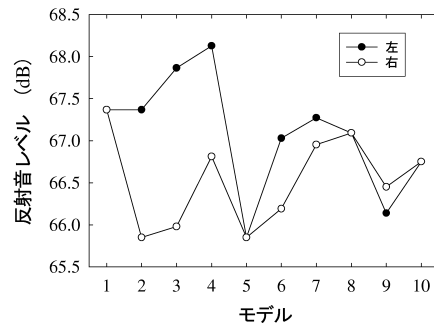


図-9 左右反射音レベル

せ, ステージ形状を非対称型にすることにより, ステージのセンターライン上において, 左右からの反射音エネルギーに差が生じるが, 十分な差には達していないと言える。よって, ステージ側壁の開き角度に加え, 吸音率や拡散性を考慮した検討が必要であると考えられる。

## 6. むすび

本研究では, 反射音方向分布が演奏しやすさに与える影響を検討すること目的とした音場評価実験, 演奏者が好ましいと感じている位置と, 反射音方向分布特性の関係を明らかにすることを目的としたアンケート調査, ステージ形状が反射音方向分布に与える影響についての音場シミュレーションを行った。

評価実験では, 演奏に用いる楽曲を統一することで前回被験者間に見られた評価のばらつきが減少した。左右の反射音のエネルギーに差がある音場は演奏しやすいと評価される傾向があり, 後方からの反射音が強い場合にもプロ奏者は高い評価をくださった。アンケート調査では, ステージのセンターライン上の客席寄りの位置が演奏しやすいとされるが, 音場評価実験によって演奏しやすいと評価される音場とは異なった。シミュレーションでは, 左右側壁の開き角度を変化させるだけでは, ステージのセンターライン上における左右の反射音レベルの差が十分ではない可能性が示唆された。

以上のことから, 演奏者が気持ちよく演奏できる「演奏しやすいステージ」は, 演奏者が演奏しやすいと思うステージ位置において, 音響的にも演奏しやすいと感じられるような反射音方向分布を実現させる必要がある。そのためには, 非対称型ステージをはじめとした新たな設計手法の提案が必要であると考えられる。

## 参考文献

- 1) A. C. Gade: Investigation of musicians' room acoustics conditions in concert halls. Part II: Field experiments and synthesis of results, *ACUSTICA*, **69**, 249-262, 1989.
- 2) 飯塚亜希子, 藤本一寿: 演奏しやすさからみたステージ音場に関する基礎的検討: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 157-158, 2005.
- 3) 林光一郎, 飯塚亜希子, 古屋浩, 藤本一寿: 中規模ホールステージにおける反射音方向特性の実測 その 1 測定概要と ST に関する考察: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 19-20, 2006.
- 4) 飯塚亜希子, 林光一郎, 古屋浩, 藤本一寿: 中規模ホールステージにおける反射音方向特性の実測 その 2 反射音方向特性に関する考察: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21-22, 2006.
- 5) 林光一郎, 飯塚亜希子, 藤本一寿: 演奏者による反射音方向分布の異なるステージ音場の評価実験: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 299-300, 2007.